

WIMP čestice

Marija Tomašević

June 11, 2014

Sažetak

Postojanje tamne materije je prvi predložio Cviki 1930-ih, ali njena priroda i dan danas predstavlja jedan od najvećih nerešenih problema fizike. Razni eksperimenti upućuju na činjenicu da je nebarionske i nerelativističke prirode. Jedan od preferiranih kandidata za nebarionsku TM jesu WIMP-ovi¹, koji su u većini modela stabilni. U ovom radu su izložene pretpostavljene osobine i interakcije ovog, za sada, najboljeg kandidata tamne materije.

1 Uvod

Dokazi za postojanje tamne materije se prikupljaju već 80 godina. Pionirski rad Frica Cvikija² pokazao je da je disperzija brzine galaksija u jatu galaksija prevelika da bi samo luminozna materija bila prisutna. Tokom 1970-ih, Vera Rubin³ i Albert Bosma⁴ su merili krive rotacije galaksija i dobili dokaze za postojanje neluminozne materije. Prvi direktan dokaz je usledio 2006. godine, kada su naučnici posmatrali sudar dva masivna jata galaksija. Koristili su teleskop koji detektuje X-zračenje i optički teleskop, da odrede raspodelu mase u novonastaloj strukturi, tzv. Metak jato. Merili su efekat gravitacionog sočiva, gde gravitaciona sila galaktičkih jata krivi svetlost galaksija u pozadini, kao što to predviđa Ajnštajnova teorija relativnosti. Više od 90% vidljive mase u jatu galaksije predstavlja vreli gas, a ostatak su zvezde. Obično gravitacija drži na okupu zvezde i vreli gas. Ali naučnici su ovaj put videli razdvajanje ovih komponenata.

Trenje, koje potiče od čestica medjuzvezdane materije, usporava vreli gas, zbog čega on zaostaje za galaksijama, koje nastavljaju da se kreću bez zadržavanja. Tamna materija prilikom sudara nije usporena ovim sudarom jer ona ne reaguje direktno sa sobom ili gasom osim kroz sile gravitacione prirode. Na taj je način došlo do razdvajanja tamne i normalne materije [Sl.1]. Da je oblak gasa bio najmasivnija komponenta ovih galaktičkih jata kao što to predlažu alternativne gravitacione teorije, ovakva podela ne bi bila vidljiva. Stoga tamna materija mora da bude prisutna.[7]

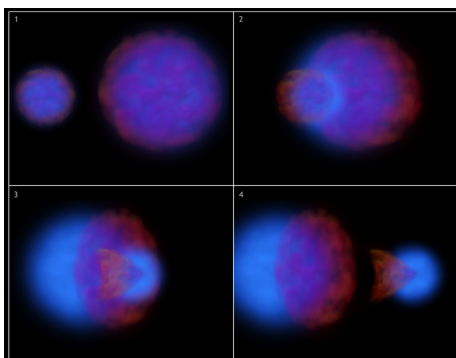
Ovi podaci nas navode na zaključak da, ne samo da postoji neluminozna materija u našem Univerzumu, već i da se većina materije sastoji od čestica nebarionske prirode.

¹Weakly Interacting Massive Particles

²Fritz Zwicky - švajcarski astronom, 1898-1974

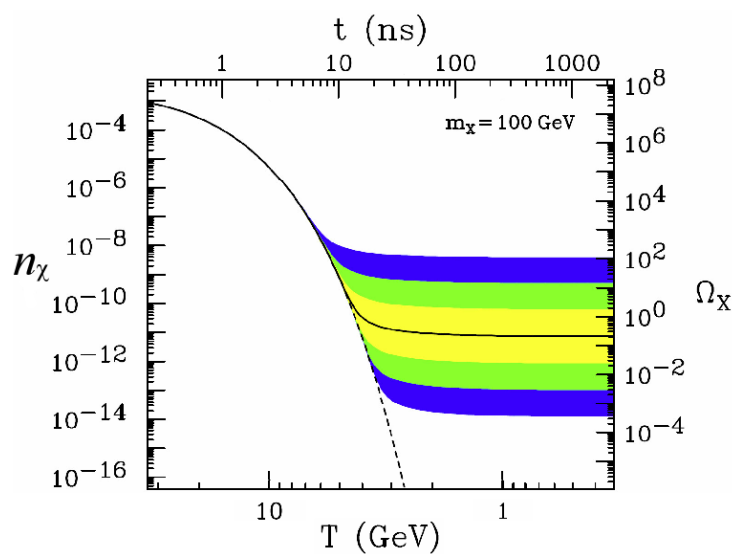
³Vera Rubin - američki astronom, rođena 1928

⁴Albert Bosma- francuski astronom



Slika 1: Ilustracija prikazuje četiri faze sudara. Vreli gas prikazan je crvenom bojom, a tamna materija plavom. Tokom sudara, gas u oba galaktička jata je usporen delovanjem gravitacione sile tamne materije koja takođe oblikuje oblak gasa u obliku metka.

Danas znamo da je gustina tamne materije 5 puta veća od gustine luminozne materije, i da čini $\sim 25\%$ našeg Univerzuma. Tačnije, ovi podaci nam pružaju



Slika 2: Gustina WIMP-ova u ranom Univerzumu. Linija koja eksponencijalno opada predstavlja količinu pri stanju ravnoteže; obojeni delovi su posmatrane vrednosti.

vrednosti gustine energije bariona, nebarionske tamne materije i tamne energije Λ :

$$\Omega_B \simeq 0.0456 \pm 0.0016 \quad (1)$$

$$\Omega_{TM} \simeq 0.227 \pm 0.014 \quad (2)$$

$$\Omega_\Lambda \simeq 0.728 \pm 0.015 \quad (3)$$

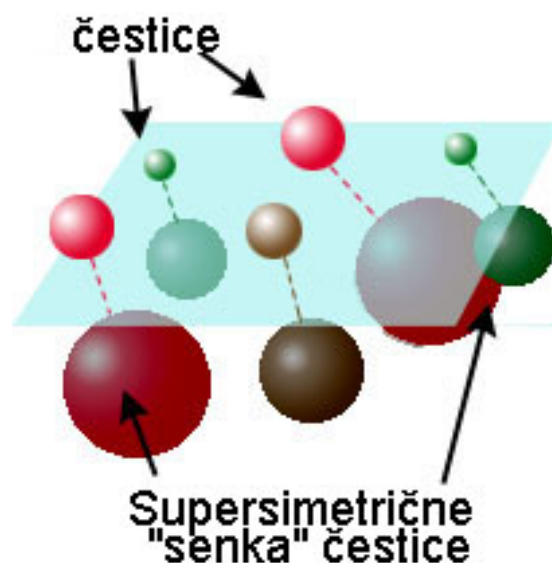
Medjutim, svi dokazi su bazirani na gravitacionim interakcijama tamne ma-

terije, dok prava priroda ove misteriozne materije ostaje nepoznata. U isto vreme, identitet tamne materije ima dubokosežne implikacije: u astrofizici, karakteristike tamne materije određuju kako se formiraju strukture (poput galaksija i jata galaksija), i takodje, utiču na prošlu i buduću evoluciju Univerzuma; u fizici čestica, tamna materija predstavlja vodeći dokaz za postojanje novih čestica, i postoji mogućnost da je povezana sa razbijanjem elektroslabe simetrije⁵, koja predstavlja jedan od glavnih problema današnjice u ovoj oblasti. Takoreći, tamna materija je dovela do, naizgled nespojive, kombinacije mikro- i makrosveta.

1.1 Vodeći kandidat

Teoretičari su, za poslednje tri decenije, došli do obilja kandidata za ovu nepoznatu materiju - od crnih rupa veličine frižidera, preostalih od Velikog Praska, do ostataka iz budućnosti čija je "strela vremena" usmerena unazad.

Ali, među stručnjacima je najrasprostranjenija zamisao da je tamna materija sačinjena od neke, još uvek neotkrivene, subatomske čestice [Sl.3]. Uprkos porastu broja manje-više egzotičnih modela ovakvih čestica, nade se polažu u "masivne čestice slabe interakcije" tzv. WIMP-ove, čije postojanje predviđaju teorije poput supersimetrije (SUSY). Teorija supersimetrije pokušava da dokaže da je skup fundamentalnih čestica - nazvan *fermioni*⁶ - jednostavno obrnuta slika drugog skupa - *bozona*⁷. Na taj način bi sve poznate subatomske čestice imale čitav niz svojih supersimetričnih partnera.[16]



Slika 3: Supersimetrični partneri - "senke"

⁵U Standardnom modelu čestica, nosioci elektroslabe sile bi trebalo da imaju iste tj. "simetrične" nula-mase, kako bi uopšte došlo do ujedinjenja elektromagnetne i slabe sile. Nosioci EM sile, fotoni, su bez mase. Problem se stvara kod nosioca slabe sile, W i Z bozona, koji zapravo imaju masu. Tako je elektroslaba simetrija masa bozona razbijena.[9]

⁶Tu spadaju elektroni, protoni, neutroni i kvarkovi

⁷Nosioci osnovnih interakcija, poput gluona i fotona

WIMP-ovi su elektroneutralne čestice, čije se mase nalaze u intervalu GeV - TeV⁸ (tipične u okviru slabih interakcija) i predstavljaju sami svoje anti-čestice. Par WIMP-ova u anihilaciji proizvodi standardne čestice, poput fermiona ili baždarnih bozona⁹.

$$\chi + \chi \rightleftharpoons f + \bar{f}, W^+ + W^-, Z^0 + Z^0, \dots \quad (4)$$

Anihilacija tamne materija ima presudnu ulogu u ranom Univerzumu, jer obezbeđuje prirodan mehanizam, u kojem se proizvode WIMP-ovi. U najranije vreme koje možemo da pratimo (od oko stotog dela sekunde posle Velikog Praska), vasiona je bila neverovatno topla ($\sim 10^{11}$ K) i ispunjena elementarnim česticama - elektronima, pozitronima, neutrinima i fotonima svetlosti. U ovoj uzavreloj mešavini, energija i materija su se stalno smenjivale, pošto su elektroni i pozitroni s jedne strane anihilirani¹⁰ uz oslobađanje energije, dok su, s druge strane, novi nastajali od fotona (Z_0) [10]. Parovi lakših čestica, poput fotona, su stvarali i čestice tamne materije, koje su u to doba postojale u formi ultra-relativističkog zračenja. Tada je reakcija (4) bila u ravnoteži. Otprilike sekund nakon rođenja vasiona, temperatura je bila 10^{10} K, i dalje previsoka da bi se neutroni i protoni vezali i formirali atomska jezgra. Vasiona se naglo hladila, i posle 10-15 s više nije bilo dovoljno energije za stvaranje novih elektrona i pozitrona. Za čestice od 10 GeV, kao što su WIMP-ovi, ovo se dešava u okviru par nanosekundi. Većina njih se anihilira, a da pri tom nema novih koji bi zauzeli njihovo mesto.

Njihova gustina zatim opada, do granice tolike razredjenosti, da više i ne interaguju međusobno. Dolazi do stabilne rasprostranjenosti čestica, čija gustina opada sa ekspanzijom prostora. Upravo zbog ove stabilnosti, WIMP-ovi danas imaju značajan doprinos masi Univerzuma [Sl.2]. Zapravo, njihova kosmološka reliktna rasprostranjenost zavisi samo od anihilacionog poprečnog preseka, kao

$$\Omega_\chi H^2 = \frac{3 \times 10^{-27} cm^3 s^{-1}}{\langle \sigma_{an} v \rangle}, \quad (5)$$

gde H predstavlja Hablovu konstantu. Sa poprečnim presekom $\langle \sigma_{an} v \rangle \sim 3 \times 10^{-27} cm^3 s^{-1}$, što je validna pretpostavka u okviru slabih interakcija, kosmološka rasprostranjenost Ω_χ teži detektovanoj vrednosti $\Omega_{TM} \simeq 0.27$. Upravo ova slučajnost, nazvana "WIMP čudo", predstavlja osnovni razlog zašto se naučnici toliko uzdaju u ovog kandidata tamne materije.

⁸1eV = 1.60217657 × 10⁻¹⁹J; 1 GeV = 10⁹eV ; 1 TeV = 10¹²eV

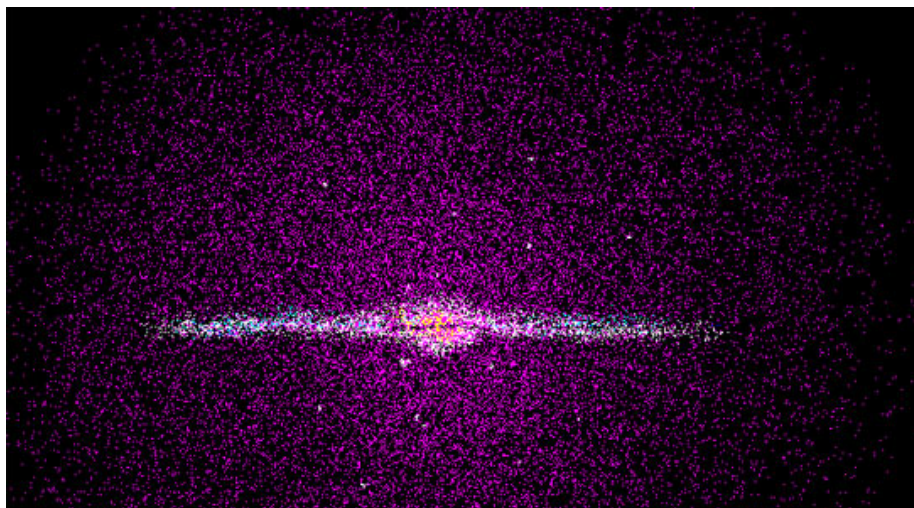
⁹Nosioci fundamentalnih interakcija - elementarne čestice deluju jedna na drugu silom tako da između sebe razmenjuju baždarne bozone, obično u obliku virtualnih čestica

¹⁰Prilikom sudara čestica i antičestica dolazi do njihove anihilacije, pri čemu se masa pretvara u energiju. U ranoj vasioni, elektroni i antielektroni (pozitroni) neprekidno su se stvarali i poništavali.

1.1.1 Opšte karakteristike

Koje su zapravo karakteristike ovog vodećeg kandidata?

1. WIMP-ovi su elementarne čestice;
2. Vrlo slabo interaguju sa normalnom - barionskom materijom:
 - Ne privlače niti odbijaju barionske čestice putem elektromagnetne sile;
 - Ne emituju i ne apsorbuju fotone;
 - Pretpostavlja se da imaju neku vrstu gravitacione interakcije sa barionima;
3. Imaju sferno-simetričnu raspodelu, sa centrom u središtu galaksije;
4. Ravnomerno su rasprostranjeni [Sl.4];
5. Obezbeđuju veliki doprinos gravitacionoj sili, koja drži na okupu vidljivi deo galaksije.



Slika 4: Raspodela WIMP-ova

1.1.2 WIMP-ovi

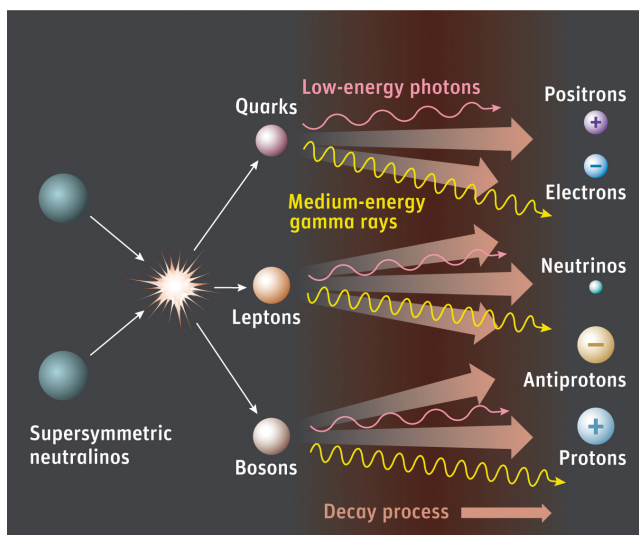
Obilje kandidata za WIMP čestice je tokom prošlog veka predloženo i proveravano, više puta. Trenutno postoji najmanje 10 "takmičara", poput WIMPzilla, aksiona, gravitona, superWIMP-ova, i još mnogo drugih, egzotičnijih.

Kandidat, koji je u poslednje vreme privukao dosta pažnje, proizilazi iz teorije supersimetrije (SUSY). [7] Supersimetrija je prvobitno predložena u fizici čestica, kao model koji bi objasnio problem "prirodnosti"¹¹ Higsovog bozona u

¹¹U fizici, prirodnost se javlja kao osobina slobodnih parametara ili fizičkih konstanti, da uzimaju vrednosti reda veličine jedinice; tj. u "prirodnoj teoriji" parametri bi imali vrednosti tipa 2.34, a ne 234.000 ili 0.00234

okviru elektroslabe interakcije. Tek nakon par godina je shvaćen pravi značaj ove jedinstvene teorije. Kako stvari sad stoje, standardna kvantna teorija polja i opšta teorija relativnosti nisu kompatibilne jedna sa drugom. S obzirom da je malo verovatno da je naš svet kontradiktoran samom sebi, potrebno je modifikovati ili kvantnu teoriju polja ili Ajnštajnovu teoriju relativnosti. Najelegantije rešenje bi predstavljala teorija, u kojoj bi gravitacija i elektroslaba sila konačno bile povezane. Zbog toga je supersimetrija jedna od naših najboljih teorija za sada. Ispostavilo se da je supersimetrija esencijalan sastojak većine teorija koje u sebi sadrže ujedinjenje gravitacije sa ostalim fundamentalnim silama. Naravno, tu još uvek nije kraj, jer Velika Ujedinjena Teorija Svega - *Grand Unified Theory of Everything* još uvek nije definisana. Ali, svakako smo makar jedan korak bliži rešenju.

Jedna od posledica postojanja ove nove simetrije jeste zagarantovana stabilnost najlakše supersimetrične čestice (NSČ). Postoji proširenje Standardnog modela čestica - Minimalni Supersimetrični Standardni Model (MSSM) - u kojem je uobičajeno da NSČ predstavlja neutralino, linearna kombinacija supersimetričnog fotona, Z_0 , i Higsovog bozona [5].



Slika 5: Anihilacija WIMP-ova

Kao masivna, stabilna čestica, najlakši neutralino je odličan kandidat za sačinjavanje hladne tamne materije [5]. U mnogim modelima stoji da je neutralino posledica termalnog stvaranja u vrućem, ranom Univerzumu, a teoretska predviđanja se slažu sa merenjima reliktno rasprostranjenosti vezanim za tamnu materiju. Neutralino se može direktnom i indirektnom metodom eksperimentalno posmatrati. U indirektnoj metodi, gama i neutrino teleskopi pretražuju nebo, tražeći dokaze za postojanje anihilacije neutralina, u oblastima velike gustine tamne materije, kao što su galaktički ili heliocentar. [8]

Što se tiče direktne metode, postoje određeni eksperimenti, kao što je CDMS¹²,

¹²Cryogenic Dark Matter Search

koji pokušavaju da detektuju vrlo retke sudare WIMP-ova sa određenim atomima raznih elemenata, koji se nalaze u detektoru na Zemlji. Jedan od mnogih detektora, sa ciljem pronalaska WIMP-ova, jeste CoGeNT¹³. CoGeNT se nalazi duboko pod zemljom, u Sudan rudniku, Minesota, gde je zaštićen od pozadinskih, kosmičkih smetnji. Naučnici pažljivo posmatraju kristal germanijuma, iščekujući sudar između dolazeće WIMP čestice i jezgra jednog atoma germanijuma u detektoru. Sudar bi trebalo da izazove generisanje merljive količine energije uzmaca.

2 Implikacije za detekciju

”WIMP čudo”, ne samo da obezbeđuje motivaciju za nezavisnim modelom u okviru slabih sila, već nam govori nešto i o tome, kako detektovati WIMP-ove. Da bi WIMP-ovi, χ , imali posmatranu reliktnu gustinu, iz njihove anihilacije moraju proizaći druge čestice. Pretpostavljajući da su te druge čestice u okviru Standardnog modela, uslov koji mora biti zadovoljen, $\chi + \chi \rightarrow SM + SM$, nam otvara tri mogućnosti za detekciju:

- Indirektna detekcija: Ako je postojala anihilacija tamne materije u ranom Univerzumu, to znači da se sada anihilacija odvija kroz $\chi + \chi \rightarrow SM + SM$, a produkti ove anihilacije jesu glavna meta za detekciju. Indirektni detektori tragaju za gama-zracima koji se oslobadaju u vasioni posle susreta čestica tamne materije sa njihovim antičesticama. Iako masa bilo koje čestice tamne materije još uvek nije poznata, a samim tim ni očekivana energija gama-zraka, lepa osobina takvih gama-zraka je da su svi gotovo iste energije.
- Direktna detekcija: Tamna materija se rasejava na atomima luminozne materije kroz $\chi + SM \rightarrow \chi + SM$ interakcije, čija oslobodjena energija može biti posmatrana u detektorima, koji se nalaze duboko pod zemljom. Direktni detektori koriste veliku masu jednog elementa, kao što je silicijum ili ksenon.
- Akceleratori čestica: Detektori sudaranja, kao što je čuveni LHC¹⁴ u Ženevi, koriste energiju sudara čestica za stvaranje novih čestica. Tamna materija može biti stvorena u toku sudara čestica, kroz $SM + SM \rightarrow \chi + \chi$ interakcije. Ovakvi događaji se ne mogu posmatrati, ali pod pretpostavkom da postoji i ”čestični ostatak” - $SM + SM \rightarrow \chi + \chi + SM$, onda oni mogu biti detektovani.

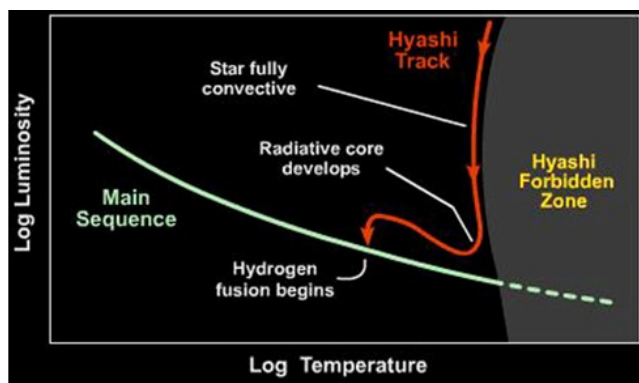
¹³Coherent Germanium Neutrino Technology

¹⁴Large Hadron Collider

3 Anihilacija tamne materije i zvezdana evolucija

Čestice tamne materije bi mogle da imaju ulogu u zvezdanoj evoluciji. Lutajući kroz galaksiju, mogle bi da budu zahvaćene od strane zvezda, pored kojih prodju. Postoji prilično dobra šansa da se WIMP-ovi sudare sa određenim atomima dok su u zvezdanoj okolini, s tim što bi, pri sudaru, izgubili dovoljno energije da postanu gravitaciono vezani. Populacija čestica tamne materije se povećava kako vreme prolazi, a koncentracija se vrši u samom jezgru zvezde. Zbog slabe interakcije WIMP-ova sa njihovom okolinom, prenos toplote na velikim rastojanjima je efektivniji od radijativne difuzije¹⁵. Centralni gradijent temperature je stoga smanjen. Ova ideja zapravo i nije nova - predložena je još 1985., kao moguće rešenje zagonetke solarnih neutrina.[13] Ali anihilacija tamne materije ublažava proces, koji ograničava porast gustine WIMP-ova. Tako da, WIMP-ovsko rešenje za zagonetku solarnih neutrina nije više održivo.

Fizičari su se 1989. fokusirali na anihilaciju tamne materije unutar zvezda. Ako se halo tamne materije formiraju iz inicijalnih sfernih konfiguracija, trebalo bi da kolapsiraju u centralni šiljak, u kojem bi gustina WIMP-ova bila ekstremno velika. Ovaj scenario bi mogao da se odigra u centru galaksije. Zvezda koja bi se nalazila u ovoj okolini bi zahvatila WIMP-ove pri takvom tempu, da bi energija oslobođena pri procesu anihilacije bila dovoljna da "uzburka" zvezdanu evoluciju. Zvezde na glavnom nizu bi postale crveni džinovi i bile bi pomerene u H-R dijagramu ka Hajaši traci [Sl.6]. Ali, ovi efekti se javljaju kod velikih stopa zahvata WIMP-ova, i zahtevaju da poprečni presek rasejanja (WIMP - atom) bude reda veličine od 1 pikobarna¹⁶. Eksperimenti vršeni putem direktne detekcije su postavili vrlo stroga ograničenja povodom poprečnog preseka, što je dovelo do iščezavanja ovog scenarija.



Slika 6: Hajaši traka

¹⁵U zvezdama se fotoni mnogo puta apsorbuju i reemituju dok ih napuštaju (termalno zračenje). U toku ovog procesa, fotoni zadržavaju potrebnu energiju karakterističnu za prethodnu apsorpciju, koju potom otpuštaju kada dodju u hladnije delove. Ovo oslobađanje energije se naziva radijativna difuzija. Na primer, foton u centru Sunca će obično preći manje od milimetra, pre nego što dodje do sledeće interakcije.

¹⁶1 pb= 10⁻⁴⁰ m²

Ideja da WIMP-ovi mogu da utiču na zvezdanu evoluciju, ponovo se javila 2007. godine. Tokom mračnog doba Univerzuma, pri crvenim pomacima od 10 do 50, tamna materija je bila mnogo gušća nego danas, pogotovo u centrima proto-haloa tamne materije. Ove substrukture se ponašaju poput bunara, u koji upadaju barioni, čim količina molekularnog vodonika postane dovoljna za efektivno hladjenje gasa. Prva generacija zvezda tzv. Populacija III, počinje da sija. Ovaj scenario se bazira na povratnoj reakciji kolapsirajućeg oblaka gasa na okolinu u kojoj je raspoređena tamna materija. Adijabatska kontrakcija povlači WIMP-ove ka unutra kako se gas skoncentriše i zagreva. Konačno, tamna zvezda je rođena, čije napajanje dolazi od anihilacije tamne materije koju sadrži. Tamna zvezda je mnogo hladnija i mnogo veća od standardnih zvezda Populacije III. Površinska temperatura ne prevazilazi 2×10^4 K, zbog čega dolazi do vrlo slabe emisije u UV oblasti. Okolni gas nije jonizovan i može se ohladiti, nakon čega bi pao na tamnu zvezdu, hraneći je time gasom i WIMP-ovima. Masa zvezde se poveća do $\sim 800M_{\odot}$, ili čak i više.

Najzad, anihilacija tamne materije prestane da bude dovoljna za napajanje zvezde, koja se potom transformiše u vrlo masivni objekat, čiji izvor energije sada predstavlja nuklearna fuzija. Masa ovog objekta je toliko velika, da postoji mogućnost da svoj život završi kao hipernova. Detekcija tamnih zvezda se odvija u infracrvenoj oblasti pomoću *James Webb* teleskopa uperenog u centralne oblasti jata galaksija, koja se ponašaju poput gravitacionih sočiva.[15, 11]

4 Možda ipak nešto drugo?

Iako postoje mnogi eksperimenti koji vrše potragu za misterioznim česticama tamne materije, mnogi fizičari su otvoreni prema pitanju šta je tamna materija i da nije možda sastavljena od nečeg apsolutno nepoznatog.

Moguće je da čitav zoo čestica sačinjava tamnu materiju. Mnoge studije ukazuju na to, da nije samo jedna čestica odgovorna za sastav tamne materije, već čitav dijapazon čestica. Tako da, ako naučnici ne pronadju odgovarajuće čestice u skorije vreme, to ne znači da tamna materija ne postoji. Jedini način da se dokaže da TM ne postoji, jeste da se obori Ajnštajnova teorija gravitacije. Uprkos mnogo truda, do sada nije smišljena nijedna nova i zadovoljavajuća teorija gravitacije koja bi se slagala sa rezultatima eksperimenata, bez pretpostavke postojanja tamne materije.

5 Zaključak

Jasno je da ne nedostaju predlozi za rešenje problema tamne materije, postavljenog još 1933. godine. Štaviše, desila se eksplozija mogućih egzotičnih rešenja u toku prethodne decenije. Kako god, medju brojnim predlozima, jedino su WIMP-ovi stvarno preživeli trajna teorijska ispitivanja. Za razliku od ostalih kandidata, WIMP-ovi ne zahtevaju nikakav egzotičan mehanizam za tzv. "WIMP čudo". Jedina spekulacija je da li postoje; a ako postoje, reliktna gustina će biti reda veličine jedinice. Osim toga, treba imati u vidu da su ove čestice prvobitno smišljene od strane fizičara čestica za rešavanje problema vezanih za Standardni model, a tek kasnije su razmatrani kao kandidati za tamnu materiju; tj. nisu uvedeni da bi rešili zagonetku tamne materije. WIMP-ovi nisu samo

malo zagolicali maštu fizičarima; mnogi su posvetili svoje živote nalaženju ovih čestica. Ipak bi trebalo naglasiti da, iako su WIMP-ovi vrlo privlačna ideja, i dalje je to samo ideja. I dalje ne postoje konkretni dokazi - akceleratori još uvek nemaju odgovarajuće rezultate, a i supersimetrija je sama po sebi još uvek nedokazana. Mada, svaka teorija je u početku samo priča, a ova, razmatrana u ovom radu, zvuči prilično uverljivo. Svakako je jasno da otkrivanje prave prirode tamne materije predstavlja izvanredan izazov, i da će otkriće čestice tamne materije biti revolucionarno - i u oblasti kosmologije, i u oblasti fizike čestica.

Literatura

- [1] Conroy, C. , Wechsler, R.H. & Kravtsov, A.V. : 2006, *Modeling Luminosity-Dependent Galaxy Clustering Through Cosmic Time*
- [2] Feng, J.L. : 2010, *Dark matter candidates from particle physics and methods of detection*
- [3] Feng, J.L. & Ritz, S. : 2014, *Planning the Future of U.S. Particle Physics Report of the 2013 Community Summer Study; Chapter 4: The Cosmic Frontier*
- [4] Griest, K. : 1991, *The Astrophysical Journal*, 366, 412-421 "Galactic Microlensing as a Method of Detecting Massive Compact Halo Objects"
- [5] Griest, K. : 1993, *The Search for Dark Matter: WIMPs and MACHOs*
- [6] Grupen, C. : 2005, *Astroparticle Physics*, 276-298
- [7] Jungman, G., Kamionkowski, M. & Griest, K. : 1996, *Phys. Rep.*267, 195
- [8] Kamionkowski, M. : 1997, *WIMP and Axion Dark Matter*
- [9] Kestenbaum, D. : 1998, *Fermi News*, 21, 2
- [10] De Pri, C. & Axelrod, A. : 2008, *The Complete Idiot's Guide to Astronomy*, 4, 244-245
- [11] Salati, P. & Silk, J. : 1989, *Astrophysical Journal*, 338, 24
- [12] Salati, P. : 2014, *Dark Matter Annihilation in the Universe*
- [13] Spergel, D.N. & Press, W.H. : 1985, *Astrophys. J.* 294 , 663
- [14] Soper, D.E. : *Weakly interacting massive particles as dark matter candidates; <http://zebu.uoregon.edu/~soper/Mass/WIMPS.html>*
- [15] Spolyar, D. , Bodenheimer, P. , Freese, K. & Gondolo, P. : 2009, *Astrophys. J.* 705 , 1031
- [16] Vojinović, G. : 2014, *Politikin Zabavnik*, 3250, 9-13